



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 44 08 195.2
22 Anmeldetag: 11. 3. 94
43 Offenlegungstag: 14. 9. 95

DE 44 08 195 A 1

71 Anmelder:
Bruker Analytische Meßtechnik GmbH, 76287
Rheinstetten, DE

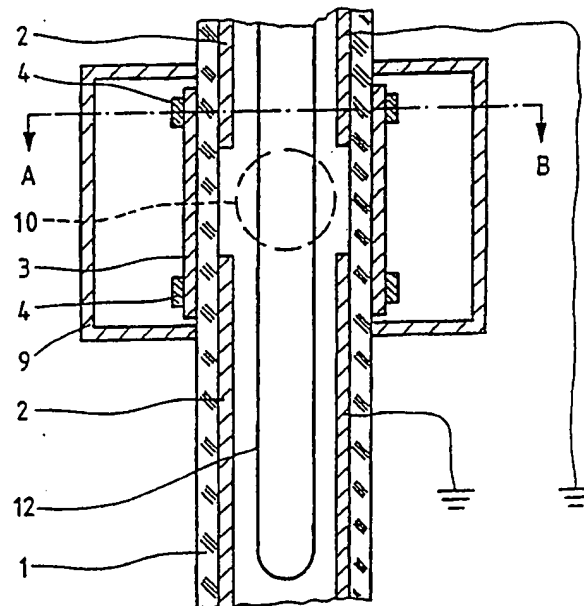
74 Vertreter:
Kohler Schmid + Partner, 70565 Stuttgart

72 Erfinder:
Keller, Tony, Dr.h.c., 76287 Rheinstetten, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Resonator für die Kernspinresonanz

57 Ein Resonator, der auf einem hohlzylindrischen Träger (1) angeordnet ist, zur Aufnahme von hochauflösenden magnetischen Kernspinresonanz-Spektren aus einer Probe, die sich entlang der Zylinderachse im Innern des Resonators erstreckt, mit einer Abschirmung (2), die den Empfindlichkeitsbereich des Resonators axial auf eine Länge begrenzt, die kürzer ist als die axiale Ausdehnung des Trägers (1), ist dadurch gekennzeichnet, daß der Resonator als axialsymmetrischer Käfigresonator ausgebildet ist. Er erzeugt in seinem Empfindlichkeitsbereich nur leicht korrigierbare statische Feldverzerrungen, besitzt einen verbesserten Füllfaktor und geringere Ohmsche Verluste und erzeugt ein homogenes HF-Feld und vermeidet die bei Quadratur-Detektion auftretenden topologischen Probleme.



DE 44 08 195 A 1

Die Erfindung betrifft einen auf einem hohlzylindrischen Träger angeordneten Resonator zur Aufnahme von hochauflösenden magnetischen Kernspinresonanzspektren aus einer Probe, die sich entlang der Zylinderachse im Innern des Resonators erstreckt, mit einer Abschirmung, die den Empfindlichkeitsbereich des Resonators axial auf eine Länge begrenzt, die kürzer ist als die axiale Ausdehnung des Trägers.

Ein solcher Resonator ist als NMR-Sonde aus der DE 43 04 871 A1 bekannt.

In einem hochauflösenden Kernresonanzspektrometer befindet sich der Hochfrequenzresonator, bzw. die Hochfrequenzspule zum Anregen und Empfangen von Kernresonanzsignalen aus einer Probe im allgemeinen in einem sogenannten Probenkopf innerhalb der axialen Raumtemperaturbohrung eines supraleitenden Magneten im Zentrum des von diesem erzeugten, dort extrem homogenen, statischen Magnetfeldes. Im allgemeinen ist die zu messende Probe eine Flüssigkeit innerhalb eines hohlzylindrischen Probenröhrchens, dessen zentraler Bereich von der Hochfrequenzspule — in der Regel einer Sattelspule — umgeben ist.

Es ist wünschenswert, den Empfindlichkeitsbereich der Hochfrequenzspule auf eine axial wohldefinierte Länge zu beschränken. Um das volle Auflösungsvermögen zu erhalten, muß nämlich das statische Magnetfeld über den gesamten Empfindlichkeitsbereich möglichst homogen sein. Die Feldhomogenität bei der hochauflösenden Kernresonanz-Spektroskopie liegt bei 10^{-9} und darunter. Neben der Grundinhomogenität des Magneten wirken sich insbesondere Feldverzerrungen aufgrund der Suszeptibilitäten der endlich langen Probe und der Hochfrequenzspule sowie anderer schwach magnetischer Teile des Probenkopfes aus. Anregung bzw. Empfang von Kernresonanzsignalen aus Probenbereichen, in denen das statische Magnetfeld von seinem Zentrumswert merklich abweicht, sollte daher vermieden werden. Solche Bereiche sind die Endbereiche der HF-Spule sowie Bereiche, in denen die Zuleitungen der Probe nahekommen. Bei den recht offenen HF-Sattelspulen greift das HF-Feld weit aus dem zentralen Probenbereich heraus und die HF-Feldlinien schließen sich unter Umständen über axial recht weit entfernte Probenbereiche. Die eingangs genannte DE 43 04 871 A1 beschreibt daher sowohl eine hohlzylinderförmige Abschirmung der Spulendbereiche und der Zuleitungen als auch eine Abschirmung der HF-Streufelder durch zwei leitfähige Scheiben axial oberhalb und unterhalb der HF-Sattelspule.

Die Verwendung einer, gegebenenfalls mit einer Abschirmung versehenen, Sattelspule als Hochfrequenzspule in einem hochauflösenden NMR-Spektrometer hat grundsätzlich eine Reihe von Nachteilen. Durch ihre offene Struktur hat sie einen schlechten Füllfaktor, d. h. nur ein Bruchteil des erzeugten HF-Magnetfeldes wird zur Anregung der Probe benutzt, bzw. nur ein Bruchteil des Probensignals wird detektiert. Aus dem gleichen Grund entsteht außerhalb des eigentlich interessierenden Probenbereichs ein HF-Streufeld, das Signale in unerwünschten Probenbereichen anregt. Dieses Streufeld kann nur aufwendig und nicht immer mit befriedigendem Erfolg abgeschirmt werden.

Ein Paar von HF-Sattelspulen ist ein recht unsymmetrisches Gebilde, das bei nicht verschwindender magnetischer Suszeptibilität des Spulenmaterials sehr schlecht korrigierbare Verzerrungen des statischen Magnetfeldes

erzeugt. Da zur Erhöhung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses ein großer Füllfaktor angestrebt wird, umgibt die Spule die Probe möglichst unmittelbar, und diese Verzerrungen wirken sich im Empfindlichkeitsbereich in der Probe aus. Eine magnetische Kompensation des Spulendrahtes kann zwar Abhilfe schaffen. Solche kompensierten Drähte sind jedoch sehr aufwendig in der Herstellung. Zudem bleibt im allgemeinen eine, wenn auch verminderte Restsuszeptibilität.

Ein HF-Sattelspulenpaar ist nur eine Komponente des Hochfrequenzschwingkreises, der auch noch mindestens einen Kondensator umfaßt. Dieser befindet sich zwar innerhalb des Probenkopfes, ist aber doch räumlich getrennt von der HF-Spule und mit dieser über etliche Zentimeter lange Leitungen verbunden. Dies erhöht den Ohm'schen Anteil im Resonanzkreis und führt zu weiteren unerwünschten Streuinduktivitäten.

Das durch ein Sattelspulenpaar erzeugte HF-Magnetfeld ist über die Probe nur mäßig homogen.

Um ein Signal in Quadratur zu detektieren, mußte man zwei um die Resonatorachse um 90° gegeneinander verdrehte Sattelspulenpaare verwenden, was weitere topologische Probleme mit sich bringt.

Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Resonator der eingangs genannten Art zum Anregen und Empfangen von Kernspinresonanzsignalen bereit zustellen, der in seinem Empfindlichkeitsbereich nur leicht korrigierbare statische Feldverzerrungen erzeugt, der einen verbesserten Füllfaktor und geringere Ohm'sche Verluste besitzt, ein weitgehend homogenes HF-Feld erzeugt und die topologischen Probleme bei Quadraturdetektion vermeidet.

Die Aufgabe wird auf überraschend einfache Weise dadurch vollkommen gelöst, daß der Resonator als axialsymmetrischer Käfigresonator ausgebildet ist.

Verwendung eines Käfigresonators anstelle von Sattelspulen ist an sich bereits aus der bildgebenden NMR-Tomographie bekannt, beispielsweise aus der DE 35 22 401 A1. Die Homogenität des Magnetfeldes im Meßvolumen eines bildgebenden Tomographieaufbaus liegt ungefähr bei 10^{-4} bis 10^{-5} und ist damit um einige Größenordnungen von der bei hochauflösender Spektroskopie zur fordernden Feldhomogenität von 10^{-9} und darunter entfernt. Außerdem sind die äußeren Abmessungen einer Tomographievorrichtung, in der normalerweise bei medizinischen Anwendungen ein ganzer Mensch im Meßvolumen Platz finden muß, wesentlich größer als die Abmessungen eines hochauflösenden NMR-Spektrometers, bei dem lediglich ein Probenröhrchen mit der zu vermessenden Substanz in das Meßvolumen eingeführt werden muß. Problematisch ist daher bei der Verwendung eines Käfigresonators in der hochauflösenden NMR-Spektroskopie die Strukturerzeugung auf dem Träger, der bei der bildgebenden Tomographie, wie oben erwähnt, relativ groß, bei der Spektroskopie hingegen ziemlich klein ist, zumal im hochauflösenden Bereich das dielektrische Trägermaterial extrem homogen sein muß. Ein weiteres Problem liegt in der räumlichen Integration der vom Schwingkreis des Resonators erforderlichen Kapazitäten in die Resonatorstruktur, wobei Kondensatoren normalerweise nicht-kompensierbare magnetische Feldstörungen bewirken.

Vorteilhaft bei der Verwendung des axial symmetrischen Käfigresonators ist der hohe Füllfaktor, die hohe Symmetrie und die daraus resultierenden geringen Störungen des magnetischen Feldes im Meßvolumen, die hohe Hochfrequenz-Homogenität sowie die relativ

geringen Ohm'schen Verlustanteile, die zu höherer Güte und einem besseren Wirkungsgrad des Resonators beitragen. Außerdem kann bei einem Käfigresonator im Gegensatz zu Sattelpulen ohne weiteres eine um 90° relativ zur HF-Anregung versetzte Quadratur-Detektion der HF-Signale durchgeführt werden.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators ist vorgesehen, daß der den Resonator bildende Käfig auf den hohlzylindrischen Träger aufgebracht, über den Umfang im wesentlichen gleichverteilte, gleichlange achsparallele metallische Stäbe umfaßt, die an mindestens einem Ende mit einem Endring jeweils über Kondensatoren verbunden sind.

Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform sind die Stäbe an beiden Enden mit Endringen über Kondensatoren verbunden.

Bei einer anderen Ausführungsform ist vorgesehen, daß der den Resonator bildende Käfig auf den hohlzylindrischen Träger aufgebracht, über den Umfang im wesentlichen gleichverteilte, gleichlange achsparallele metallische Stäbe umfaßt, die an mindestens einem Ende mit den ihnen benachbarten Stäben jeweils über Kondensatoren verbunden sind.

Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform können die Stäbe an beiden Enden über Kondensatoren verbunden sein.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform sind die Stäbe und die Kondensatoren auf der Außenwand des hohlzylindrischen Trägers angebracht, und die Abschirmung erstreckt sich axial mindestens jeweils im axialen Bereich der Kondensatoren auf der Innenwand des Trägers. Dadurch wird der HF-Resonator im Bereich der Kondensatoren HF-mäßig gegen das Meßvolumen abgeschirmt, so daß von den Kondensatoren sowie den Endbereichen der Käfigstäbe herrührende Störungen minimiert werden.

Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform sind die zum Resonator gehörigen Strukturen wie Stäbe und/oder Abschirmungen und/oder Endringe gänzlich oder teilweise aus auf den Träger aufgedampften oder aufgetragenen Schichten aufgebaut.

Auch die Kondensatoren können aus auf das Trägerrohr aufgedampften Schichten aufgebaut sein, wobei je nach verwendetem Material (Glas, Quarz, Keramik usw.) das dünne Trägerrohr als Dielektrikum wirken kann.

Vorzugsweise bestehen die Stäbe und/oder die Abschirmung sowie gegebenenfalls die Endringe weitgehend aus einem Metall hoher Leitfähigkeit.

Besonders bevorzugt ist eine Ausführungsform, bei der die Stäbe und/oder die Abschirmung und/oder gegebenenfalls die Endringe aus mindestens zwei Komponenten bestehen, deren magnetische Suszeptibilitäten sich gegenseitig kompensieren, so daß die Feldhomogenität im Meßvolumen nicht beeinträchtigt wird. Man spricht zwar von "Suszeptibilitätskompensation". Dies bedeutet jedoch nicht, daß jeweils zwei Materialien exakt entgegengesetzter Suszeptibilität verwendet werden müßten. Die eigentlich kompensierte Größe ist jeweils das Produkt aus Volumen und Suszeptibilität.

Beispielsweise kann bei Ausführungsformen eine Komponente aus einem diamagnetischen Metall bestehen, während die andere Komponente aus einem paramagnetischen Metall besteht. Die Feinstruktur der leitfähigen Käfigstrukturen ist dabei relativ unwichtig, jedoch muß die axiale Länge jeweils gleich sein, um eine resultierende Gesamtsuszeptibilität aufgrund von geometrischen Asymmetrien im Meßvolumen zu vermei-

den. Die Verwendung einer harten Komponente hat zudem den zusätzlichen Vorteil, daß damit besonders harte, insbesondere kratzsteife Oberflächen der Resonatorstruktur geschaffen werden.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators ist vorgesehen, daß die Stäbe und/oder die Abschirmung sowie gegebenenfalls die Endringe aus mindestens zwei Komponenten bestehen, von denen die eine hohe, die andere eine vergleichsweise geringe Hochfrequenz (HF)-Leitfähigkeit aufweist.

Dadurch kann sichergestellt werden, daß der HF-Strom nahezu ausschließlich in der HF-leitfähigen Komponente der Struktur fließt.

Vorteilhaft ist eine Weiterbildung dieser Ausführungsform, bei der die Komponenten mit hoher HF-Leitfähigkeit eine Schichtdicke aufweisen, die ein Mehrfaches, vorzugsweise mindestens das 3-fache der HF-Eindringtiefe beträgt.

Da die HF-Eindringtiefe bei den üblichen Frequenzen etwa bis 5–10 µm liegt, sollten die Schichtdicken im Bereich von 15–100 µm liegen.

Um die gewünschte Suszeptibilitätskompensation zu erreichen, können die beiden Komponenten mit hoher und geringer HF-Leitfähigkeit räumlich in radialer Richtung des Resonators übereinander oder in Umfangsrichtung versetzt nebeneinander angeordnet sein.

Die Kondensatoren des erfindungsgemäßen Resonators sollten eine möglichst geringe magnetische Suszeptibilität aufweisen, um entsprechende Feldstörungen im Meßvolumen von vornherein so klein wie möglich zu halten.

Vorzugsweise sind die Kondensatoren durch Wahl entsprechender Materialien oder durch aufgetragene Zusätze gegenüber dem Meßvolumen im Resonator suszeptibilitätskompensiert. Eine Suszeptibilitätskompensation der Kondensatoren gegenüber dem Meßvolumen im Resonator kann aber auch zusätzlich durch die Verwendung eines geeigneten Lötmaterials bewirkt werden, mit welchem die Kondensatoren elektrisch leitend an der Resonatorstruktur befestigt sind.

Um ein Driften der Meßsignale zu vermeiden, sollten die für den erfindungsgemäßen Resonator verwendeten Kondensatoren temperaturunempfindlich sein.

Besonders bevorzugt sind die verwendeten Kondensatoren SMD (surface mounted device)-Bauteile. Diese lassen sich besonders einfach in die Schichtstruktur des Käfigresonators einbauen bzw. mit dieser verbinden.

Anstelle von Kondensatoren können bei einer weiteren Ausführungsform leitfähige, in Umfangsrichtung des Resonators die Lücken zwischen den Stäben an deren Enden überbrückende Schichten an der Innenseite des Trägers vorgesehen sein. Da der Träger in der Regel aus dielektrischem Material, meistens aus Glas oder Quarz besteht, entstehen durch die Stabstrukturen und überlappende Flächen der überbrückenden Schichten an den Enden der Stäbe Kapazitäten.

Alternativ dazu können die Kondensatoren auch eingespart werden, wenn bei einer anderen Ausführungsform eine die Stäbe umhüllende und in Umfangsrichtung des Resonators die Lücke zwischen den Stäben an deren Enden überbrückende dielektrische Isolatorschicht sowie eine die Isolatorschicht ringförmig umgebende, elektrisch leitfähige Schicht vorgesehen ist. Dadurch können Kapazitäten zwischen den Stäben und der ringförmigen Leiterschicht erzeugt werden.

Bei einer Weiterbildung der beiden erwähnten Ausführungsformen ist im axialen Bereich der überbrücken-

den Schichten keine Abschirmung vorgesehen, da die Stäbe und die überbrückenden Schichten durch Materialwahl und Geometrie so gestaltet werden können, daß der Einfluß ihrer Summensuszeptibilität im Meßvolumen des Resonators im wesentlichen kompensiert ist.

Die Resonanzfrequenz des erfindungsgemäßen Resonators liegt typischerweise oberhalb von 400 MHz. Sein typischer Durchmesser ist kleiner als 20 mm, und die Anzahl der Stäbe beträgt typischerweise zwischen 4 und 16. Dadurch unterscheidet sich der erfindungsgemäße Resonator in seinen äußeren Abmaßen sowie in seinem Betriebsbereich ganz wesentlich von bekannten Käfigresonatoren aus der bildgebenden NMR-Tomographie.

Um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des erfindungsgemäßen Resonators zu verbessern, kann eine Vorrichtung zur Quadratur-Detektion um 90° versetzt zur HF-Anregung vorgesehen sein. Besonders günstig wirkt sich die Quadratur-Detektion bei den in der hochauflösenden NMR-Spektroskopie üblichen rotationssymmetrischen Proben aus.

Alternativ dazu ist eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators, bei dem die Käfigstäbe über den Umfang der Resonatorstruktur äquidistant verteilt sind, wobei zwei gegenüberliegende Stäbe ausgelassen sind. Damit wird eine Stabilisierung der linearen Schwingungsmoden erreicht und Modeninstabilitäten vermieden. Um Unsymmetrien zu vermeiden, können die beiden Stäbe auch verbleiben. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß kein oder nur ein geringer HF-Strom durch sie fließen kann, etwa durch Unterbrechung oder die Wahl "falscher" Kapazitätswerte.

Der Käfig kann bei besonderen Ausführungsformen so ausgelegt sein, daß sich in seinem Inneren zwei orthogonale HF-Felder unterschiedlicher Frequenz erzeugen und detektieren lassen. Dadurch können mit der gleichen Meßanordnung gleichzeitig zwei verschiedene Kernarten und ihre Spinkopplungen (z. B. Protonen und C^{13}) untersucht werden.

Bei einer einfachen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators ist das Trägermaterial für die Käfigstruktur Glas.

Vorteilhaft ist auch eine Ausführungsform, bei der der erfindungsgemäße Resonator zusätzlich einen coaxialen, metallischen äußeren Abschirmzylinder mit größerem Durchmesser als der Trägerzylinder umfaßt, mit dem der Resonator unempfindlich gegen die Außenwelt gemacht wird, so daß im Meßvolumen stets definierte Zustände bezüglich der Feldverteilungen herrschen.

Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform kann der Endring des Resonators mit dem äußeren Abschirmzylinder leitend verbunden sein. Dies erhöht die Abschirmwirkung und die Unempfindlichkeit des Resonators gegenüber äußeren Einflüssen.

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der beigefügten Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die erwähnten Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter.

Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand konkreter Ausführungsbeispiele näher beschrieben und erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1a einen schematischen Längsschnitt durch einen

erfindungsgemäßen Resonator;

Fig. 1b einen schematischen Querschnitt längs der Linie A-B in Fig. 1a;

Fig. 2a einen schematischen Querschnitt durch eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators;

Fig. 2b einen schematischen Querschnitt durch eine andere Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators; und

Fig. 3 ein elektrisches Ersatzschaltbild für eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators.

Der in Fig. 1a gezeigte erfindungsgemäße HF-Resonator zur Aufnahme von hochauflösenden magnetischen Kernresonanz(NMR)-Spektren aus einer Probe, in der Regel einer in einem Probenröhrchen 12 befindlichen Flüssigkeitsprobe, die sich entlang der Zylinderachse im Innern des Resonators erstreckt, weist einen hohlzylindrischen Träger 1 auf, auf dessen Umfang um ein Meßvolumen 10 herum elektrische leitende, über den Umfang im wesentlichen gleichverteilte, gleichlange achsparallele metallische Stäbe 3 aufgebracht bzw. aufgedampft sind. Die Stäbe sind entweder mit einem Endring 4 oben und/oder unten jeweils über Kondensatoren 5 miteinander verbunden. Sie können aber auch bei einer nicht dargestellten Ausführungsform an einem oder beiden Enden jeweils direkt mit den ihnen benachbarten Stäben 3 über Kondensatoren 5 verbunden sein. Die Stäbe 3 bilden dabei die Induktivitäten und die Kondensatoren die Kapazitäten eines HF-Schwingkreises.

Um den Empfindlichkeitsbereich des so gebildeten axialsymmetrischen Käfigresonators axial auf eine bestimmte Länge zu begrenzen, die kürzer als die axiale Ausdehnung des Trägers 1 ist, sind im Innern des Resonators Abschirmungen 2 vorgesehen, die im gezeigten Beispiel an der Innenwand des Trägerrohres 1 aufgebracht sind.

Bei dem in Fig. 1a und 1b gezeigten Beispiel ist zusätzlich ein coaxialer metallischer äußerer Abschirmzylinder 9 vorgesehen, der einen größeren Durchmesser als der Trägerzylinder 1 aufweist und das Meßvolumen 10 gegen äußere Einflüsse abschirmt.

Die Strukturen des Resonators wie Stäbe 3, Abschirmung 2, Endringe 4 und äußere Abschirmung 9 können beispielsweise weitgehend aus Silber bestehen, um eine möglichst hohe Leitfähigkeit zu garantieren. Sie können aber auch aus zwei Komponenten aufgebaut sein, deren magnetische Suszeptibilitäten sich gegenseitig kompensieren, so daß im Meßvolumen 10 keine magnetische Feldstörungen aufgrund der Resonatorstrukturen auftreten. Dabei kann eine Komponente aus einem diamagnetischen Metall bestehen, während die andere aus einem paramagnetischen Metall besteht. Weiterhin können die Strukturen des Käfigresonators aus Komponenten aufgebaut sein, von denen die eine eine hohe, die andere eine geringe Hochfrequenzleitfähigkeit aufweist, so daß die hochleitfähige Komponente die HF-Ströme voll aufnimmt. Insbesondere sollte die hochleitfähige Komponente eine Schichtdicke aufweisen, die ein Mehrfaches, vorzugsweise mindestens das 3-fache der HF-Eindringtiefe bei der benutzten Hochfrequenz beträgt. Zur Kompensation können die beiden Komponenten räumlich in radialer Richtung des Resonators übereinander oder in Umfangsrichtung versetzt nebeneinander angeordnet sein.

Bei der in Fig. 1b gezeigten Ausführungsform sind zwei gegenüberliegende Stäbe in der Käfigstruktur ausgelassen, damit sich eindeutige HF-Schwingungsmoden einstellen und Modeninstabilitäten vermieden werden.

In Fig. 3 ist ein elektrisches Ersatzschaltbild der Aus-

führungsform des Käfigresonators nach Fig. 1b gezeigt, wobei die Stäbe 3 durch Induktivitäten L und die Kondensatoren durch Kapazitäten C, C' dargestellt sind. Ein Ausgleichskondensator Cb führt gegen das Erdpotential, während mit einem Tuning-Kondensator Ct eine Verstimmung des Schwingkreises vorgenommen werden kann. Über einen Anpassungskondensator Cm wird das vom Resonator aufgenommene Meßsignal an eine Detektionsvorrichtung 11 weitergeleitet.

Typische Kapazitätswerte für die Kondensatoren im gezeigten Beispiel sind $C = 10 \text{ pF}$, $C' = 7 \text{ pF}$, $C_b = 5 \text{ pF}$, $C_t = 1-5 \text{ pF}$ (variabel) und $C_m = 1-7 \text{ pF}$ (variabel).

Die gezeigte Vorrichtung 11 kann bei Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Käfigresonators, bei dem die beiden gegenüberliegenden Stäbe 3 nicht weggelassen sind, als Quadratur-Detektor ausgeführt sein.

Die Resonanzfrequenz des Käfigresonators liegt in der Regel oberhalb von 400 MHz. Der Durchmesser des Käfigs ist typischerweise kleiner als 20 mm, wobei die Anzahl der Stäbe 3 zwischen 4 und 16 liegt. Als Material für den Träger 1 kommt beispielsweise Glas in Frage.

Fig. 2a zeigt eine spezielle Ausführungsform, bei der anstelle von Kondensatoren 5, in Umfangsrichtung des Resonators die Lücken zwischen den Stäben 3 an deren jeweiligen Enden überbrückende leitfähige Schichten 6 an der Innenseite des dielektrischen Trägers 1 vorgesehen sind. In den Überlappungsbereichen zwischen den Stäben 3 und den Schichten 6 entstehen daher im Dielektrikum des Trägers 1 Kapazitäten für den Schwingkreis des Resonators.

Bei einer weiteren Ausführungsform, die in Fig. 2b gezeigt ist, ist anstelle von Kondensatoren eine die Stäbe 3 umhüllende und in Umfangsrichtung des Resonators die Lücken zwischen den Stäben 3 an deren Enden überbrückende dielektrische Isolatorschicht 7 sowie eine die Isolatorschicht 7 ringförmig umgebende, elektrische leitfähige Schicht 8 vorgesehen. Dadurch werden im Dielektrikum 7 zwischen den leitfähigen Stäben 3 und der leitfähigen Ringschicht 8 ebenfalls Kapazitäten aufgebaut, die die Kondensatoren ersetzen.

Bei den beiden in Fig. 2a und 2b gezeigten Ausführungsformen kann eine Abschirmung 2 im axialen Bereich der die Lücken zwischen den Stäben 3 überbrückenden Schichten 6 bzw. 7 und 8 weggelassen werden.

Patentansprüche

1. Resonator, der auf einem hohlzylindrischen Träger (1) angeordnet ist, zur Aufnahme von hochauflösenden magnetischen Kernspinresonanz-Spektren aus einer Probe, die sich entlang der Zylinderachse im Innern des Resonators erstreckt, mit einer Abschirmung (2), die den Empfindlichkeitsbereich des Resonators axial auf eine Länge begrenzt, die kürzer ist als die axiale Ausdehnung des Trägers (1), dadurch gekennzeichnet, daß der Resonator als axialsymmetrischer Käfigresonator ausgebildet ist.
2. Resonator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der den Resonator bildende Käfig auf den hohlzylindrischen Träger (1) aufgebrachte, über den Umfang im wesentlichen gleichverteilte, gleichlange achsparallele metallische Stäbe (3) umfaßt, die an mindestens einem Ende mit einem Endring (4) jeweils über Kondensatoren (5) verbunden sind.
3. Resonator nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) an beiden Enden mit

Endringen (4) über Kondensatoren (5) verbunden sind.

4. Resonator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der den Resonator bildende Käfig auf den hohlzylindrischen Träger (1) aufgebrachte, über den Umfang im wesentlichen gleichverteilte, gleichlange achsparallele metallische Stäbe (3) umfaßt, die an mindestens einem Ende mit den ihnen benachbarten Stäben (3) jeweils über Kondensatoren (5) verbunden sind.

5. Resonator nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) an beiden Enden über Kondensatoren (5) verbunden sind.

6. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) und die Kondensatoren (5) auf der Außenwand des hohlzylindrischen Trägers (1) angebracht sind und die Abschirmung (2) sich axial mindestens jeweils im axialen Bereich der Kondensatoren (5) auf der Innenwand des Trägers (1) erstreckt.

7. Resonator nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) und/oder die Abschirmung (2) und gegebenenfalls die Endringe (4) aus aufgedampften oder aufgetragenen Schichten aufgebaut sind.

8. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) und/oder die Abschirmung (2) sowie gegebenenfalls die Endringe (4) weitgehend aus Silber bestehen.

9. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) und/oder die Abschirmung (2) sowie gegebenenfalls die Endringe (4) aus mindestens zwei Komponenten bestehen, deren magnetische Suszeptibilitäten sich kompensieren.

10. Resonator nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß eine Komponente aus einem diamagnetischen Metall, die andere aus einem paramagnetischen Metall besteht.

11. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) und/oder die Abschirmung (2) sowie gegebenenfalls die Endringe (4) aus mindestens zwei Komponenten bestehen, von denen die eine hohe, die andere eine geringe Hochfrequenz (HF)-Leitfähigkeit aufweist.

12. Resonator nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Komponenten mit hoher HF-Leitfähigkeit eine Schichtdicke aufweisen, die ein Mehrfaches, vorzugsweise mindestens das 3-fache der HF-Eindringtiefe beträgt.

13. Resonator nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Komponenten räumlich in radialer Richtung des Resonators übereinander oder in Umfangsrichtung versetzt nebeneinander angeordnet sind.

14. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Kondensatoren (5) eine möglichst geringe magnetische Suszeptibilität aufweisen.

15. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Kondensatoren (5) durch Wahl entsprechender Materialien weitgehend suszeptibilitätskompensiert sind.

16. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Kondensatoren (5) mit Hilfe eines Lötmaterials an der Resonatorstruktur elektrisch leitend befestigt sind, welches so ausgesucht ist, daß es eine Suszeptibilitätskompen-

sation der Kondensatoren (5) gegenüber dem Meßvolumen (10) im Resonator bewirkt.

17. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Kondensatoren (5) temperaturunempfindlich sind. 5
18. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Kondensatoren (5) SMD (surface mounted device)-Bauteile sind.
19. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle von Kondensatoren leitfähige, in Umfangsrichtung des Resonators die Lücken zwischen den Stäben (3) an deren Enden überbrückende Schichten (6) an der Innenseite des Trägers (1) vorgesehen sind. 10
20. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle von Kondensatoren eine die Stäbe (3) umhüllende und in Umfangsrichtung des Resonators die Lücken zwischen den Stäben (3) an deren Enden überbrückende dielektrische Isolatorschicht (7) sowie eine die Isolatorschicht (7) ringförmig umgebende, elektrisch leitfähige Schicht (8) vorgesehen ist. 20
21. Resonator nach Anspruch 19 oder 20, dadurch gekennzeichnet, daß im axialen Bereich der überbrückenden Schichten (6; 7, 8) keine Abschirmung (2) vorgesehen ist. 25
22. Resonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß seine Resonanzfrequenz oberhalb von 400 MHz liegt.
23. Resonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß sein Durchmesser kleiner ist als 20 mm. 30
24. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Anzahl der Stäbe (3) zwischen 4 und 16 liegt. 35
25. Resonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Vorrichtung (11) zur Quadratur-Detektion der mit dem Resonator aufgenommenen Meßsignale vorgesehen ist. 40
26. Resonator nach einem der Ansprüche 2 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Stäbe (3) über den Umfang äquidistant verteilt sind, wobei zwei gegenüberliegende Stäbe ausgelassen sind.
27. Resonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Material des Trägers (1) Glas ist. 45
28. Resonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß er zusätzlich einen coaxialen, metallischen äußeren Abschirmzylinder (9) mit größerem Durchmesser als der Trägerzylinder (1) umfaßt. 50
29. Resonator nach Anspruch 2 oder 3 und nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, daß der Endring (4) mit dem äußeren Abschirmzylinder (9) leitend verbunden ist. 55
30. Resonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß seine Käfignstruktur so ausgebildet ist, daß sich in seinem Inneren zwei orthogonale HF-Felder unterschiedlicher Frequenz gleichzeitig erzeugen und detektieren lassen. 60

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

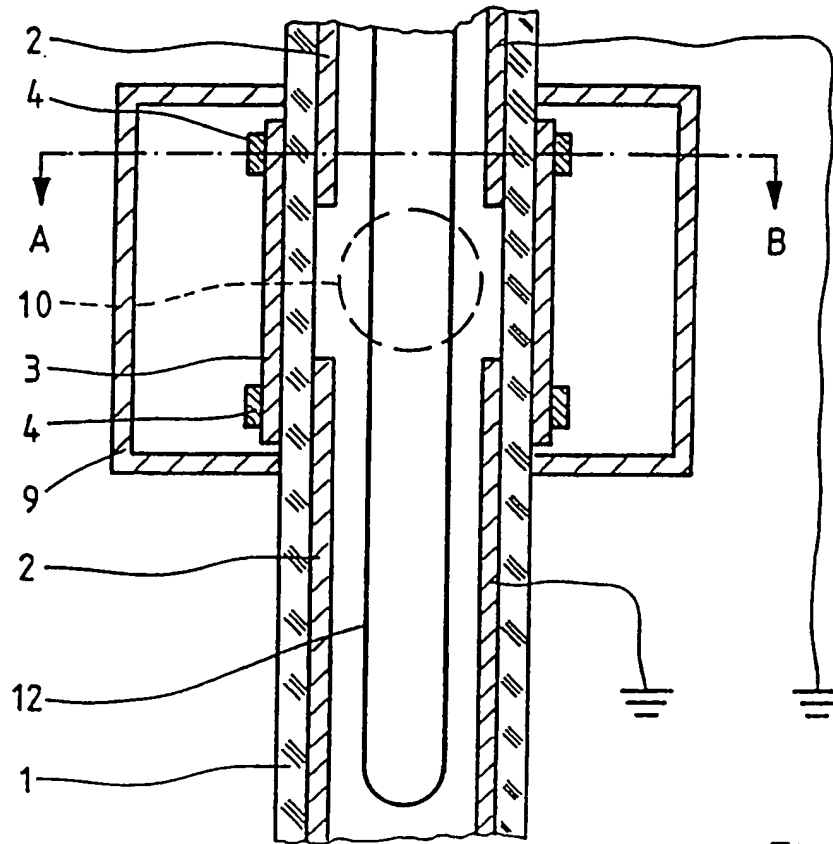


Fig.1a λ

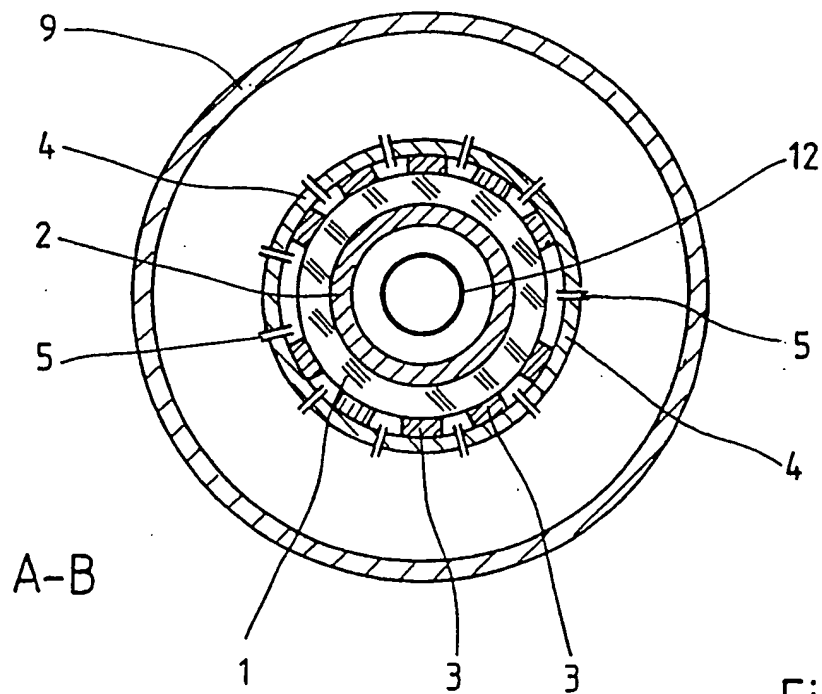


Fig.1b

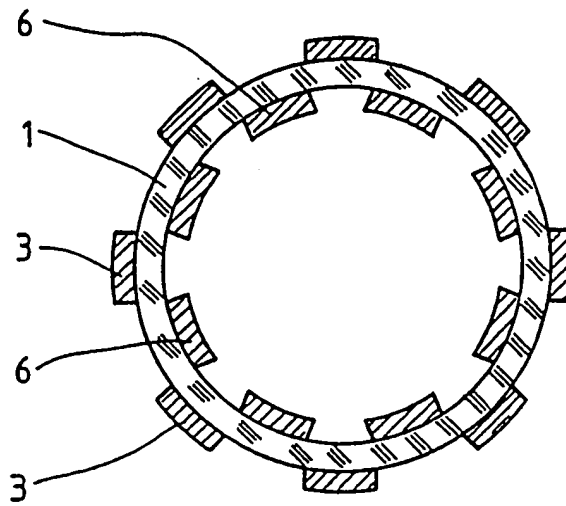


Fig. 2a

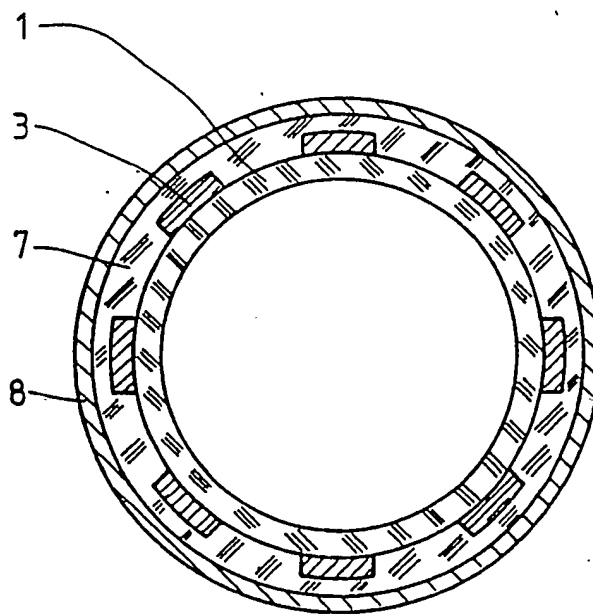


Fig. 2b

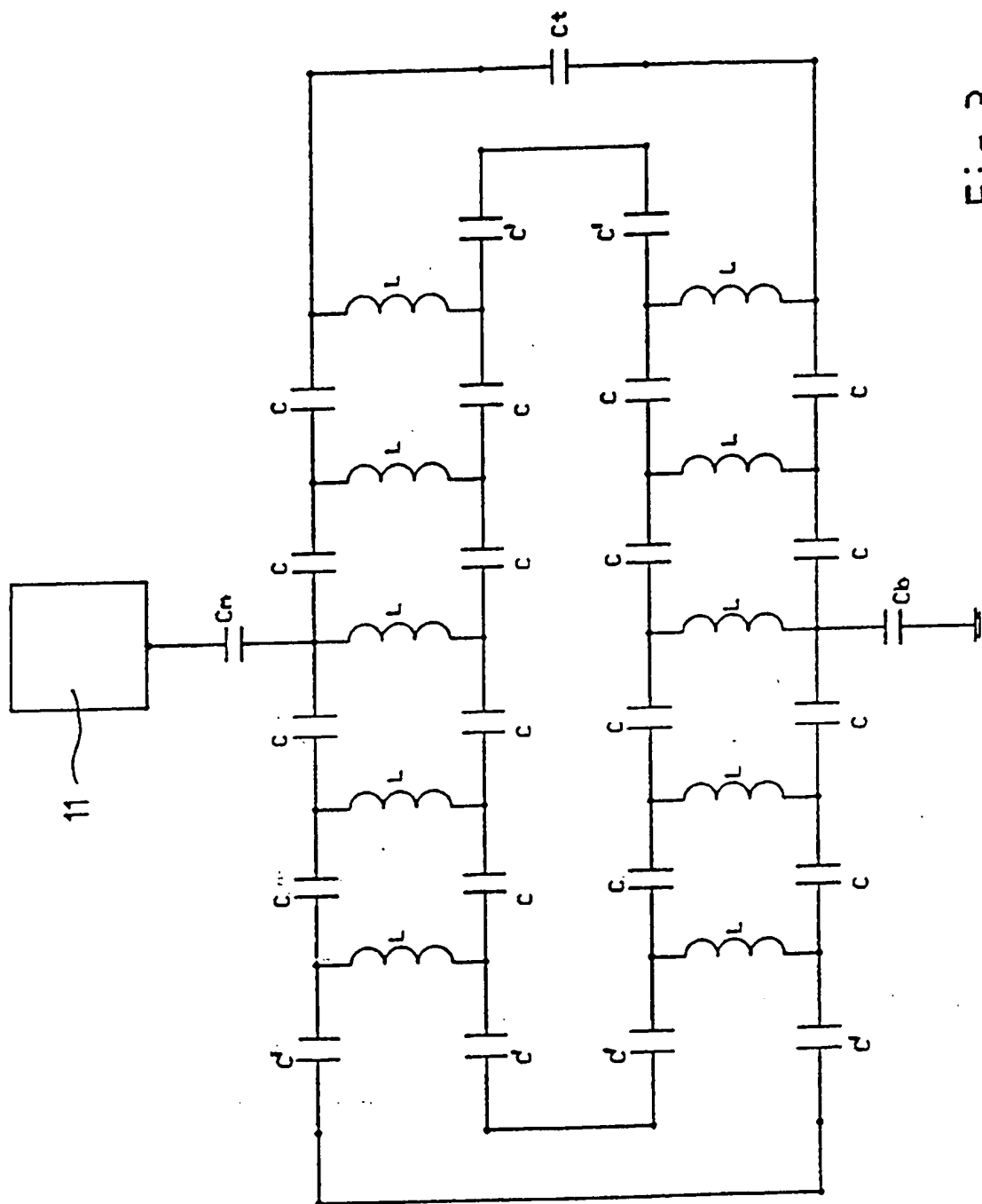


Fig. 3